

**M U N I**  
**M E D**

# **Energetický metabolismus**

## **Fyziologie práce**

# Energetický metabolismus

= souhrn všech chemických (a fyzikálních) procesů zahrnutých v:

- produkci **energie** z vnitřních i vnějších zdrojů
- syntéze a degradaci strukturálních a funkčních prvků tkání
- vylučování odpadních látek a toxinů z těla

**Rychlost metabolismu:** množství energie uvolněné za jednotku času

**Kalorie** (cal) = množství tepelné energie, potřebné ke zvýšení teploty 1g vody o 1°C, z 15°C na 16°C.

CUKRY

TUKY

PROTEINY

VSTUP = SPOTŘEBA  
ENERGIE ENERGIE

MECHANICKÁ  
PRÁCE

Svalová kontrakce  
Pohyb buněk (bičků), organel

SYNTÉZA

Tvorba energetických zásob  
Růst tkání  
Tvorba esenciálních molekul

MEMBRÁNOVÝ  
TRANSPORT

Minerály  
Organické látky  
AMK

TVORBA A PŘENOS  
SIGNÁLŮ

Elektrické  
Chemické  
Mechanické

PRODUKCE  
TEPLA

Regulace tělesné teploty  
Neúčinné chemické reakce

DETOXIKACE  
DEGRADACE

Tvorba moči  
Konjugace  
Oxidace  
Redukce

## 1. zákon termodynamiky:

**Za ustáleného stavu musí vstup (příjem) energií odpovídat výstupu (výdej)**

Vstup  $\longleftrightarrow$  zásoby

Výdej energie = vnější práce + zásoby energie + teplo

Mezistupně: různé chemické, mechanické a termické reakce

### **PŘÍJEM ENERGIE**

Cukry, tuky, bílkoviny

Spalováním vzniká: 4.1kcal/g, 9.3kcal/g, 5.3kcal/g (4.1 v těle)

1kcal=4 184J

Přeměna proteinů a cukrů na tuky – účinné uložení energie

Přeměna proteinů na cukry – potřeba rychlé energie

**ALE:** neexistuje signifikantní přeměna tuků na cukry

# Výdej energie

- 1. V klidu:** bazální metabolismus; 8 000 kJ / den; 200-250 ml O<sub>2</sub>/min; přímo závislý na hmotnosti a **povrchu těla**; klesá s **věkem** ; stoupá s okolní **teplotou**; ve spánku klesá o 10-15%; geneticky determinován **75%BM**
  - 2. Po najezení:** malé zvýšení energetického výdeje – **specifický dynamický efekt** – např. na tvorbu glykogenu **7%BM**
  - 3. U sedících lidí:** spontánní fyzická aktivita **18%BM**
  - 4. Fakultativní termogeneze:** netřesová
- 
- 5. Při tělesné aktivitě:** největší část energetických nároků organismu; individuální; mění se podle ročního období

- **Zásoba** energie: ATP, kreatinfosfát, GTP, CTP (cytosin), UTP (uridin), ITP (inosin)
- Makroergní vazba – 12kcal/mol
- Účinnost není 100% - 18kcal substrátu na 1vazbu v ATP
- Denně: 63 kg ATP (128 mol)
- Glykolýza: jen krátkodobý zdroj energie (2 pyruváty – jen asi 8% energie glc); přísun glc je omezený, laktát

## RESPIRAČNÍ KVOCIENT

$$\text{RQ} = V_{\text{CO}_2} : V_{\text{O}_2}$$

(za jednotku času, za ustáleného stavu)

Cukry: RQ = 1

Tuky: RQ = 0,7

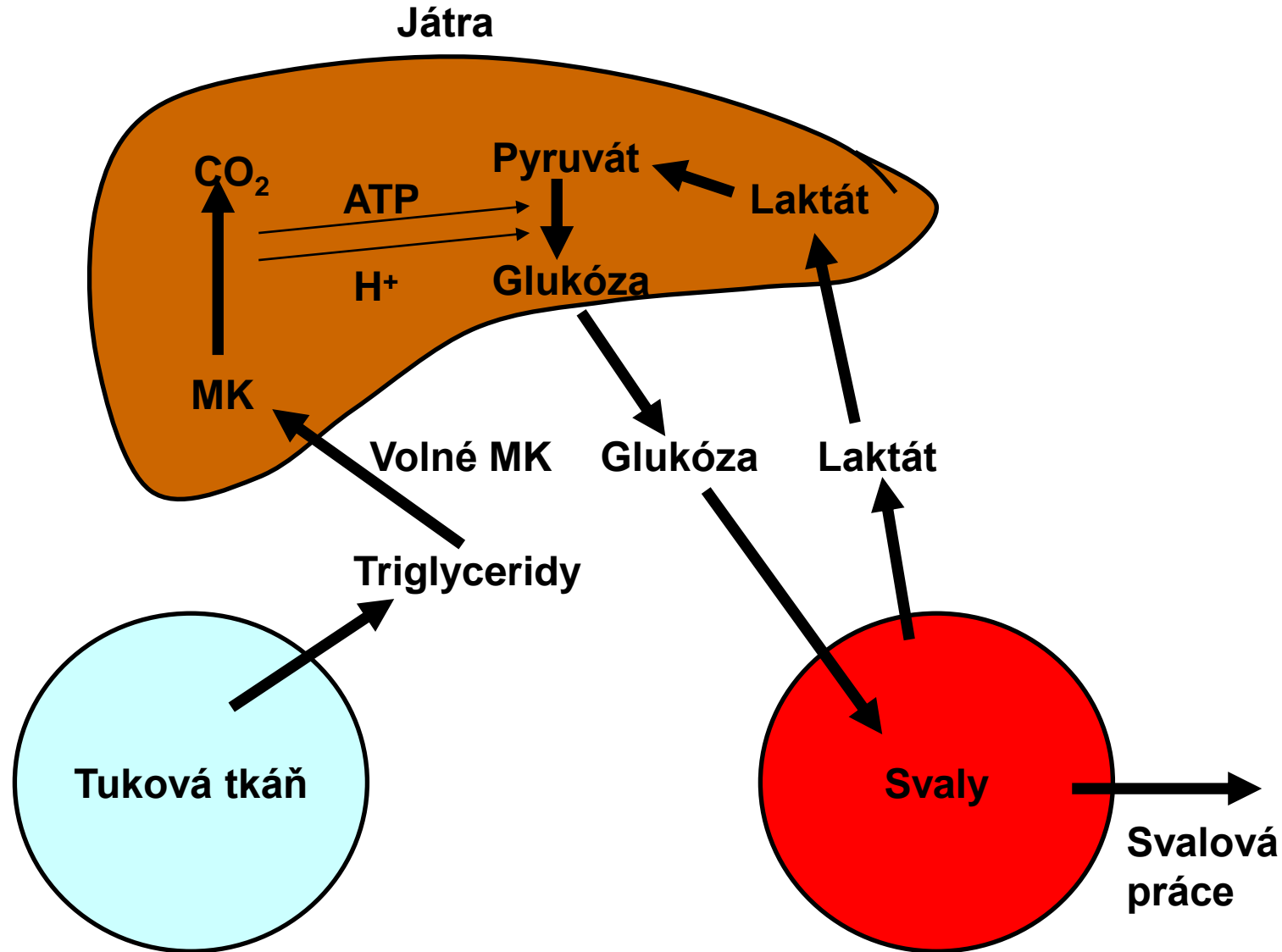
Proteiny: RQ = 0,8

**R** – poměr respirační výměny (není ustálený stav!)

# Uskladnění a přesuny energie

- Vstup energie stejně jako výdej je nepravidelný – **nutnost uskladnění**
- **75%** zásob: triglyceridy (9kcal/g) **v tukové tkáni** (10-30% tělesné hmotnosti), vydrží až 2 měsíce ; zdroj – MK z potravy a esterifikace s  $\alpha$ -glycerolfosfátem nebo syntéza MK z acetylCoA z glykolýzy – přeměna cukrů na efektivnější zásobu energie = tuk
- **25%** zásob: **proteiny** (4kcal/g); přeměna na cukry (glukoneogeneza při stresu); nepříznivé následky pro organismus
- Méně než **1%** zásob: **cukry** (4kcal/g) ve formě glykogenu; důležité pro CNS!!! a krátkodobou velkou zátěž;  $\frac{1}{4}$  zásob glykogenu v játrech (75-100g), zbytek ve svalech (300-400g); jaterní glykogen – glykogenolýza – uvolnění glukózy; svalový glykogen – využití jen ve svalech (není glukoso-6-fosfatáza)
- **Glukoneogeneza**: z pyruvátu, laktátu a glycerolu a AMK (kromě leucinu); NE z acetyl-CoA
- **Uskladnění a přenos energie vyžaduje vstup další energie**: 3% z původní energie – tuky (triglyceridy do tukové tkáně), 7% - glukóza (glykogen), 23% - přeměna cukrů na tuky, 23% - přeměna AMK na proteiny nebo glukózu (glykogen)

# Přesuny energie mezi orgány

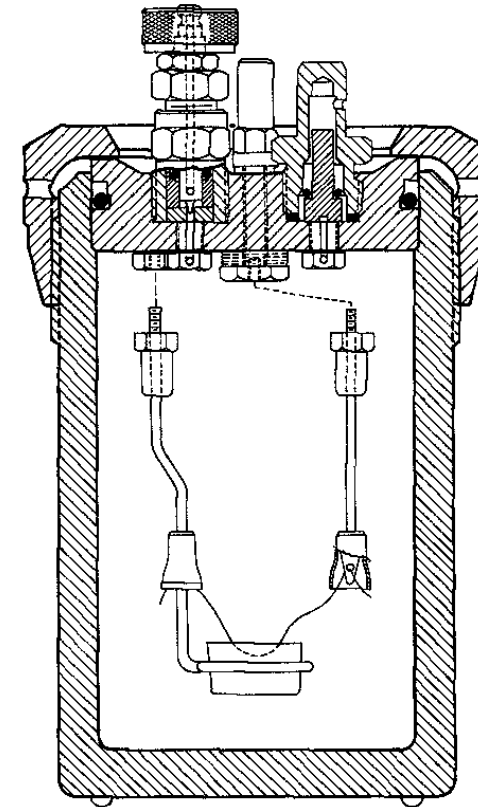


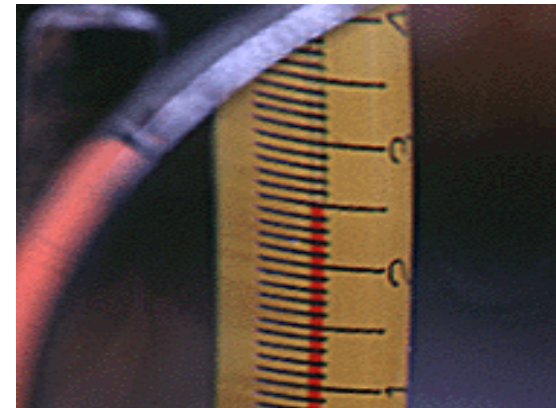
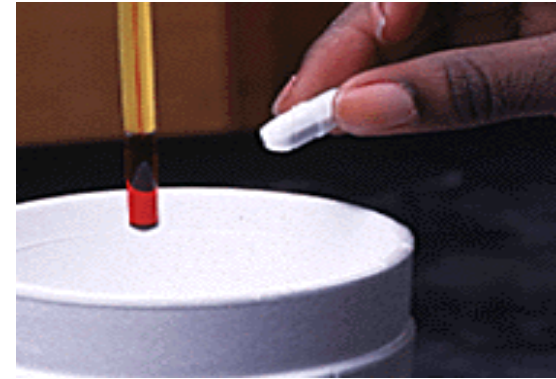


# Kalorimetrie přímá

= měření energie uvolněné spálením potravy mimo tělo (oxidace sloučenin v [kalorimetru](#))

1. Kalorická bomba
2. Celotělový kalorimetr (pro laboratorní zvířata, pro člověka)





# Kalorimetrie nepřímá

- Množství spotřebovaného  $O_2$
- Množství energie uvolněné na 1 mol spotřebovaného  $O_2$  se liší s typem oxidované látky (vliv skladby potravy)
  - **energetický ekvivalent**



# Faktory ovlivňující bazální metabolismus

- Svalová práce (před i při měření)
- Příjem potravy (před měřením)
- Vysoká či nízká okolní teplota (křivka závislosti má tvar písmene **U**)
- Výška, váha, **povrch těla**
- Pohlaví
- Věk
- Emoční stav
- Tělesná teplota
- Thyroidální status
- Množství katecholaminů v krvi

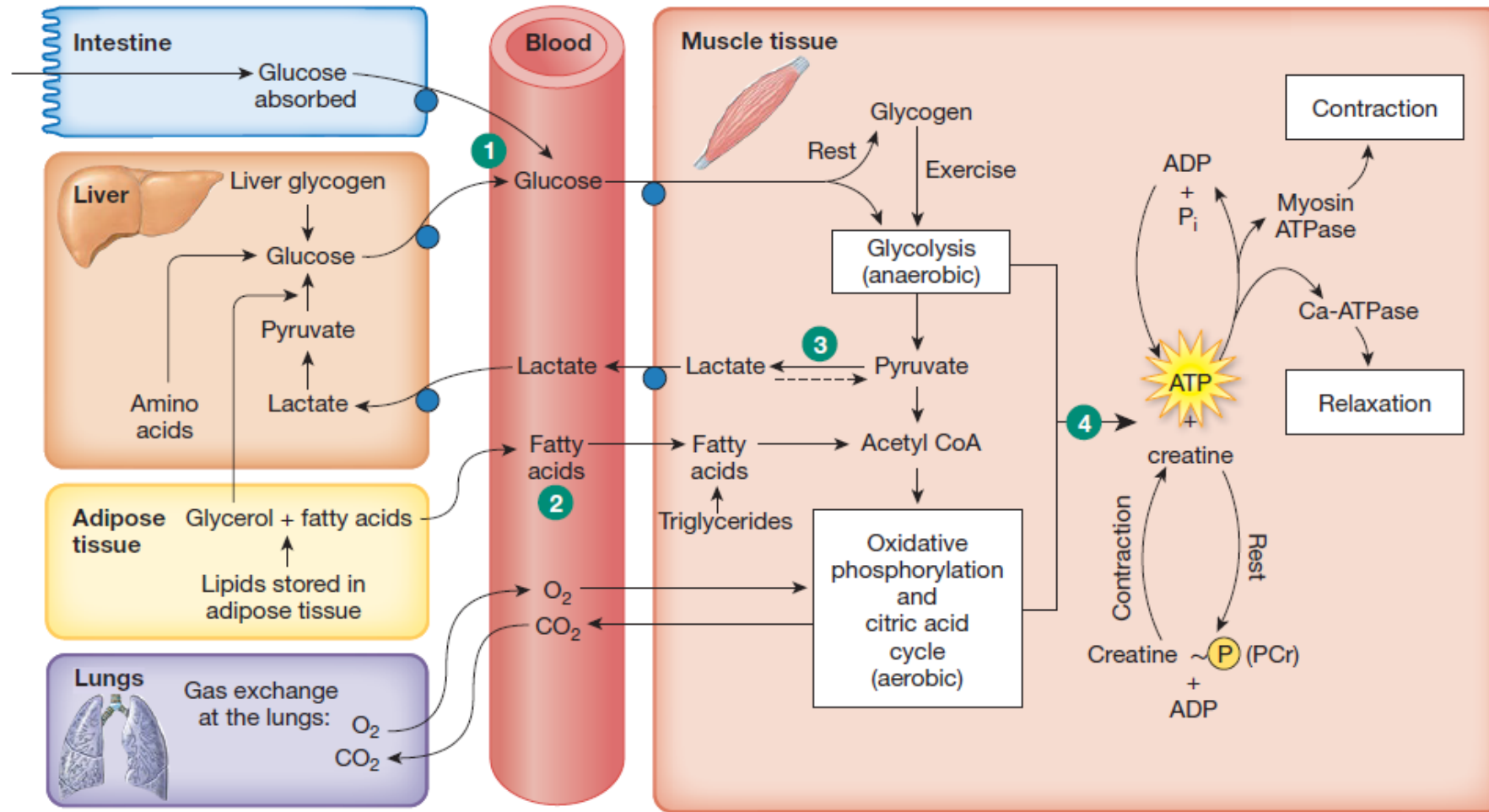
# Práce (fyzická aktivita, cvičení)



# Kosterní sval

- Kontrakce: izometrická (statická práce) vs. isotonická (dynamická práce)
- Metabolismus: aerobní vs. anaerobní
- **Metabolická autoregulace krevního průtoku:**
  - ↓pO<sub>2</sub>; ↑pCO<sub>2</sub>; ↓pH; ↑K<sup>+</sup>; ↑lokální teplota
- Krevní průtok závisí na svalovém napětí (vysoké napětí = snížený průtok)
- Svalová vřeténka – svalové napětí – aferentace – udržuje aktivaci SNS

# Metabolismus kosterního svalu



# Reakce organismu na zátěž (práci)

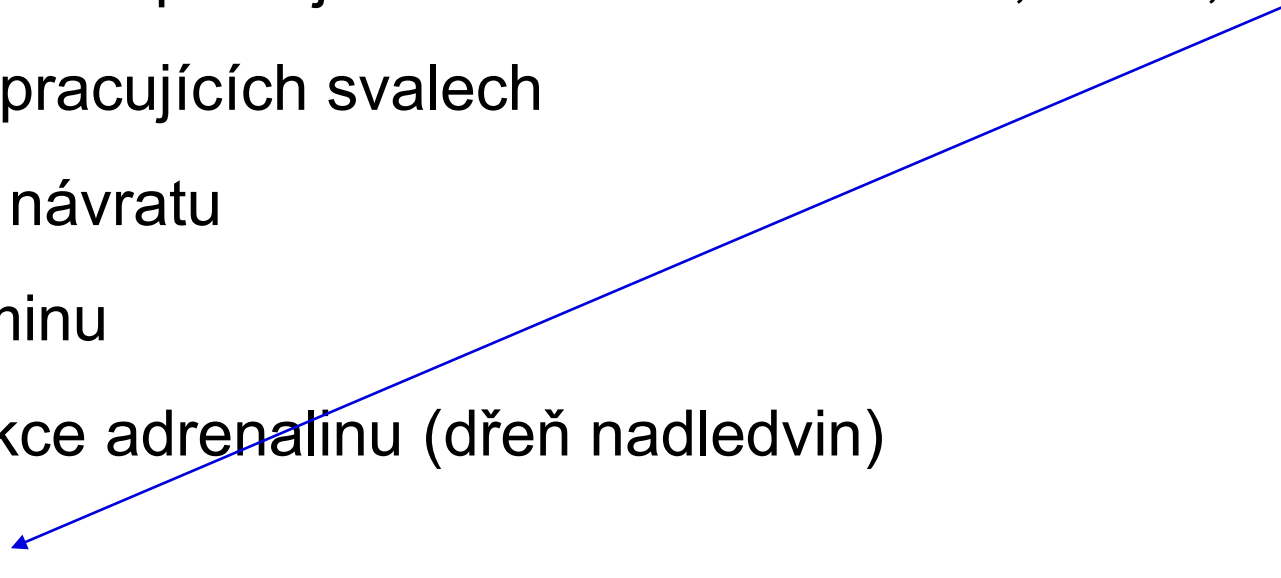
- Sympatický nervový systém (ergotropní systém)
- Kardiovaskulární změny
- Respirační změny
- Metabolické změny
- **HOMEOSTÁZA**



# Anticipace fyzického výkonu

- Reakce organismu (zejména KVS) ještě před zahájením práce
- Připravuje organismus na zvýšené metabolické nároky pracujících kosterních svalů
- Změny stejné jako v časně fázi odpovědi na zátěž
- Podobnost s reakcí na stres (fight-or-flight)

# Reakce kardiovaskulárního systému na práci

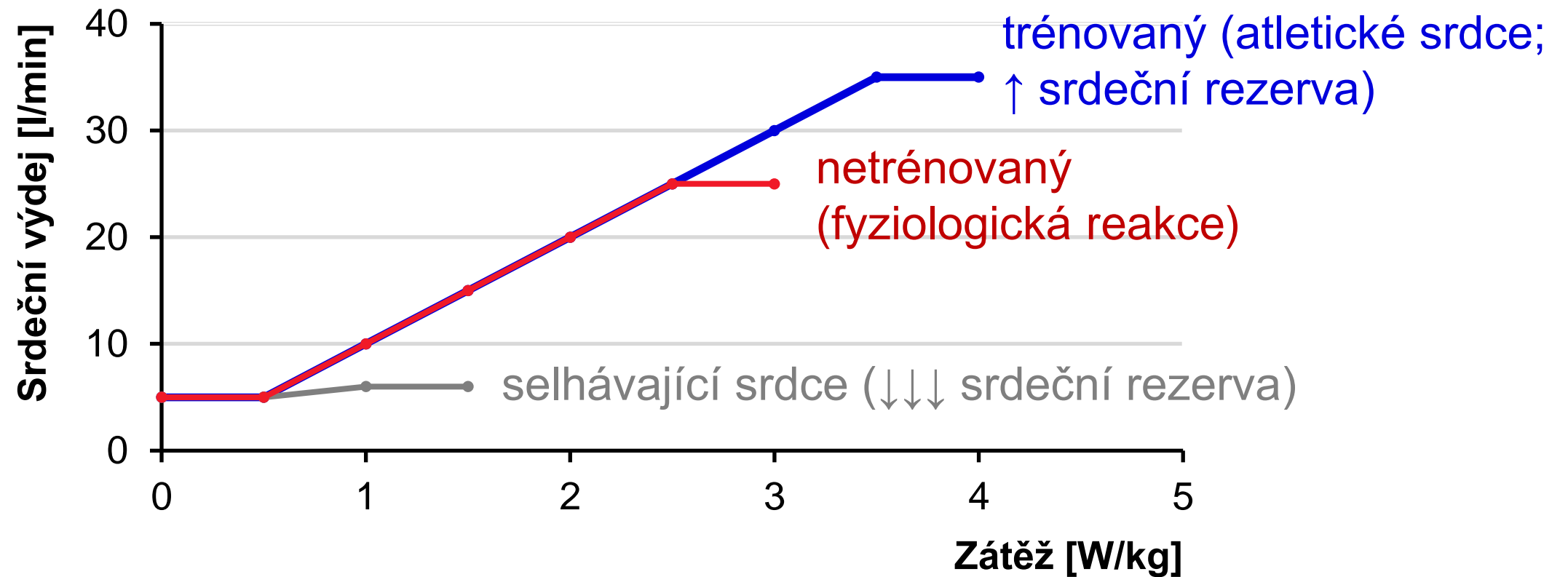
- Zvýšení srdečního výdeje
  - **Redistribuce krve:**
  - *Vazokonstrikce*: v nepracujících kosterních svalech, v GIT, **kůži**, (ledvinách)
  - *Vazodilatace* v pracujících svalech
  - Zvýšení žilního návratu
  - Uvolnění histaminu
  - Zvýšená produkce adrenalinu (dřeň nadledvin)
  - Termoregulace
- 

# Zvýšení srdečního výdeje. Srdeční rezerva

- $SV = SO \times SF$  (SNS: pozitivní inotropní a chronotropní efekt)
- **Srdeční rezerva = maximální SV / klidový SV** (4 – 7)
- Koronární rezerva = maximální KP / klidový KP (~3,5)
- Chronotropní rezerva = maximální SF / klidová SF (3 – 5)
- Objemová rezerva = maximální SO / klidový SO (~1,5)

*SV – srdeční výdej; KP – koronární průtok; SO – systolický objem; SF – srdeční frekvence*

# Srdeční rezerva u zdravého a selhávajícího srdce



# Změny arteriálního tlaku krve

PARAMETR	V KLIDU	PŘI ZÁTĚŽI	NÁRŮST (x)
<b>Srdeční výdej</b> [l/min]	5 – 6	25 (35)	4 – 5 (7) <i>srdeční rezerva</i>
<b>Srdeční frekvence</b> [1/min]	(45) 60-90	190 – 200 (220) <i>závisí na věku</i>	3 – 5 <i>chronotropní rezerva</i>
<b>Systolický objem</b> [ml]	75	115	~1.5 <i>objemová rezerva</i>
<b>Systolický TK</b> [mmHg]	120	<i>statická práce</i> ↑ <i>dynamická práce</i> ↑↑	
<b>Diastolický TK</b> [mmHg]	70	<i>statická práce</i> ↑↑↑ <i>dynamická práce</i> – / ↓	
<b>Střední arteriální tlak (MAP)</b> [mmHg]	~90	<i>statická práce</i> ↑ <i>dynamická práce</i> – / ↑	
<b>Perfuze kosterních svalů</b> [ml/min/100g]	2 – 4	60 – 120 (180)	30 (10% CO <sub>max</sub> )

# Reakce respiračního systému na zátěž

- Dechové centrum -  $\uparrow$  ventilace
  - chemoreceptory:  $\uparrow$   $p\text{CO}_2$  +  $\downarrow$  pH
  - proprioceptory v plicích
- Sympatický nervový systém (stres – anticipace)

# Reakce respiračního systému na zátěž

PARAMETR	V KLIDU	PŘI ZÁTĚŽI	NÁRŮST (x)
<b>Ventilace</b> [l/min]	6 – 12	90 – 120	15 – 20 <i>respirační rezerva</i>
<b>Frekvence dýchání</b> [1/min]	12 – 16	40 – 60	4 – 5
<b>Dechový objem (<math>V_T</math>)</b> [ml]	0.5 – 0.75	~2	3 – 4
<b>Průtok plicnicí (perfuze plic)</b> [ml/min]	5 – 6	25 – 35	4 – 6
<b>Spotřeba <math>O_2</math> (<math>V_{O_2}</math>)</b> [ml/min]	250 – 300	~3000	10 – 12 (25)
<b>Produkce <math>CO_2</math></b> [ml/min]	~200	~8000	~40

# Spotřeba kyslíku ( $\dot{V}_{O_2}$ )

– Spiroergometrie

– Klidová  $\dot{V}_{O_2}$ : **~3.6** mlO<sub>2</sub>/(min.kg)

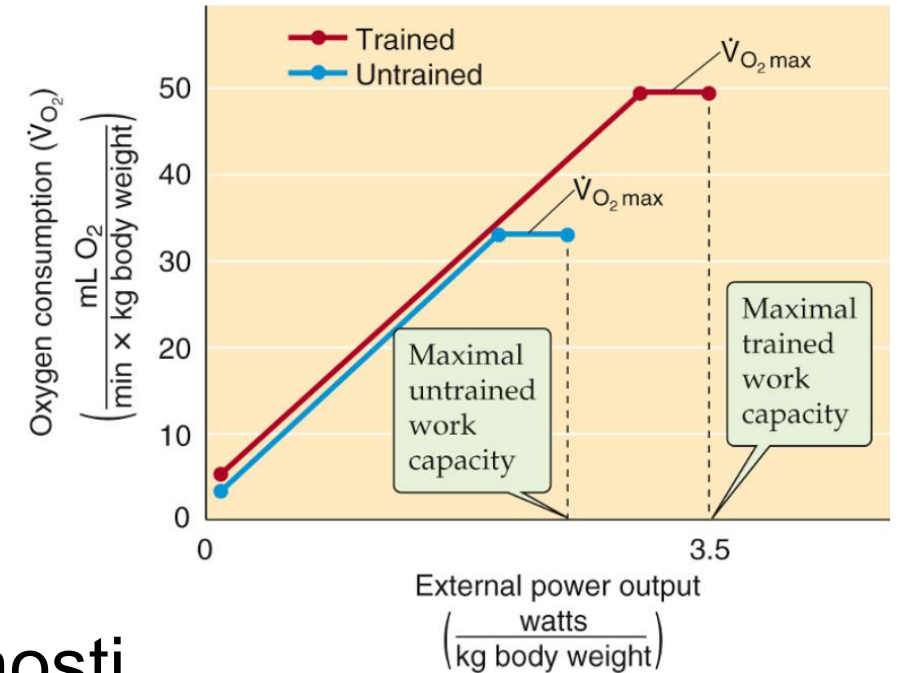
–  $\dot{V}_{O_2 \max}$  – objektivní ukazatel aerobní výkonnosti

– netrénovaná osoba středního věku: **30 – 40** mlO<sub>2</sub>/(min.kg)

– elitní vytrvalostní atlet: **80 – 90** mlO<sub>2</sub>/(min.kg)

– pacient s těžkým srdečním selháním /CHOPN : **10 – 20** mlO<sub>2</sub>/(min.kg)

Adopted from:  
<https://studentconsult.inkling.com/read/boron-medical-physiology-3e/chapter-60/figure-60-6>





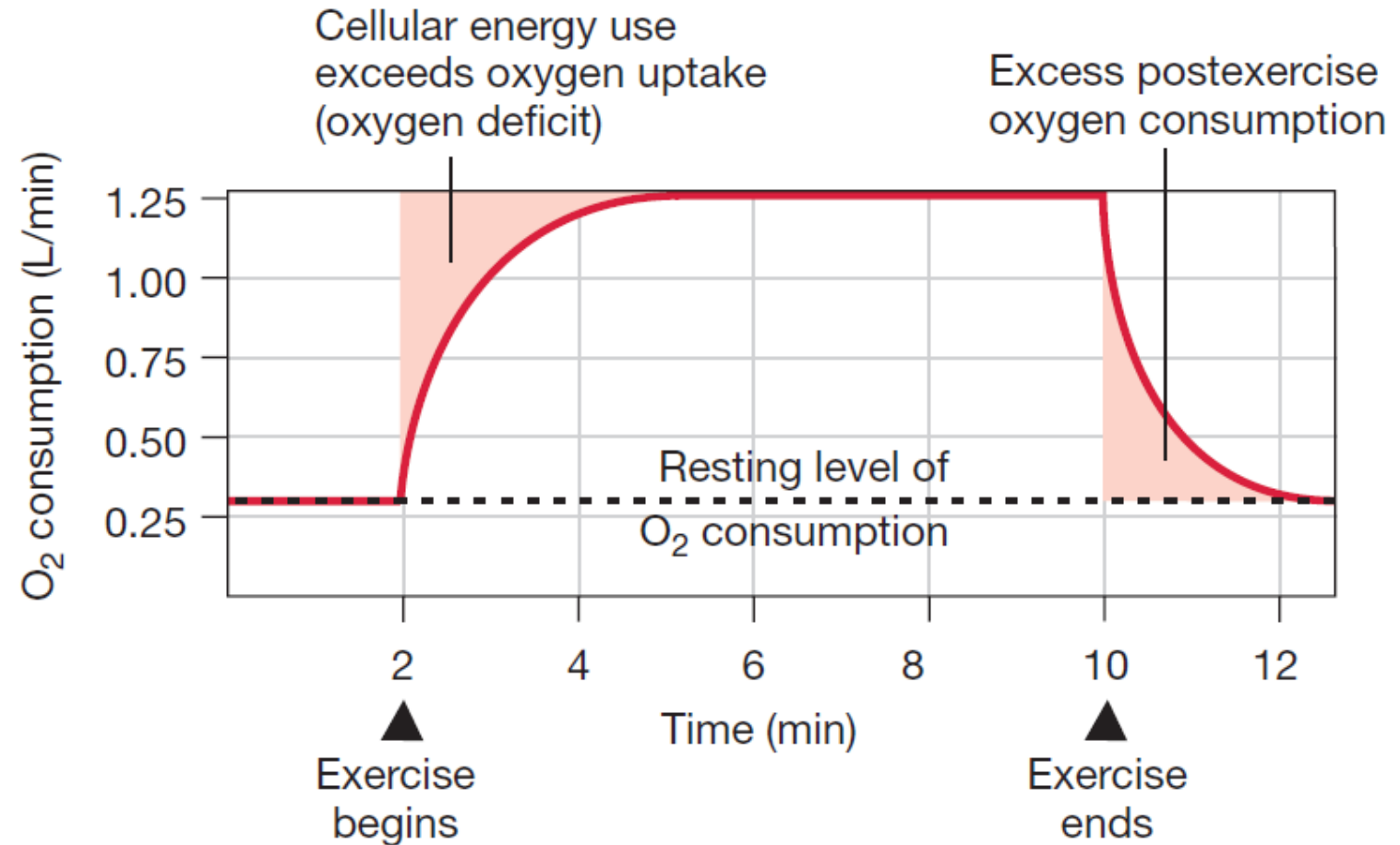
# Determinanty $V_{O_2 \max}$

1. Příjem  $O_2$  v plicích
  - ventilace plic, celková difuzní kapacita plic
2. Dodávka  $O_2$  do svalů
  - průtok krve (tlakový gradient – srdeční výdej vs. odpor)
  - koncentrace hemoglobinu (kapacita krve pro  $O_2$ )
3. Extrakce  $O_2$  z krve do svalů
  - $pO_2$  gradient: krev - mitochondrie

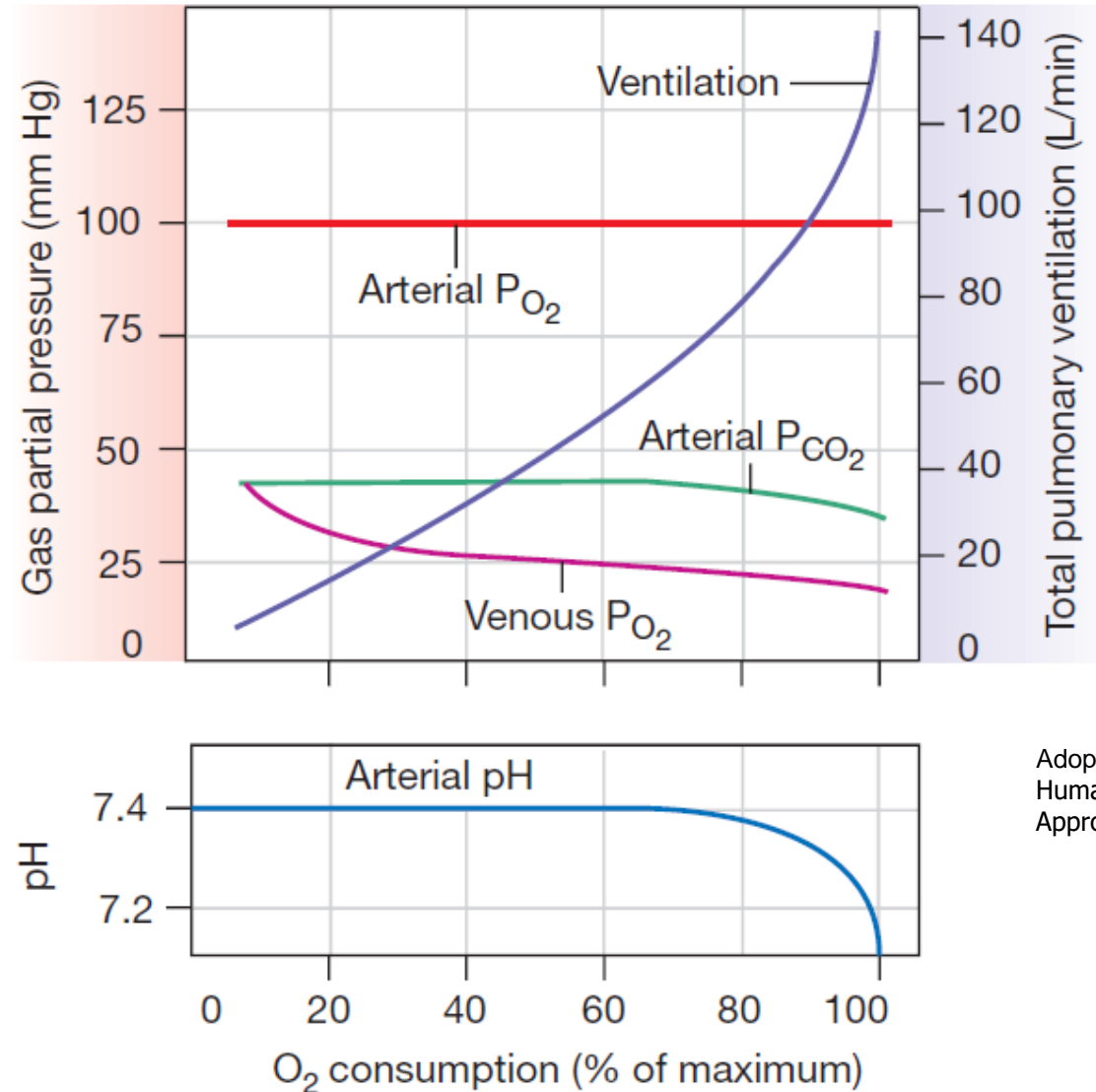
# Spotřeba kyslíku během zátěže

Adopted from: D.U.Silverthorn:  
Human Physiology (An Integrated  
Approach)

## – Kyslíkový dluh



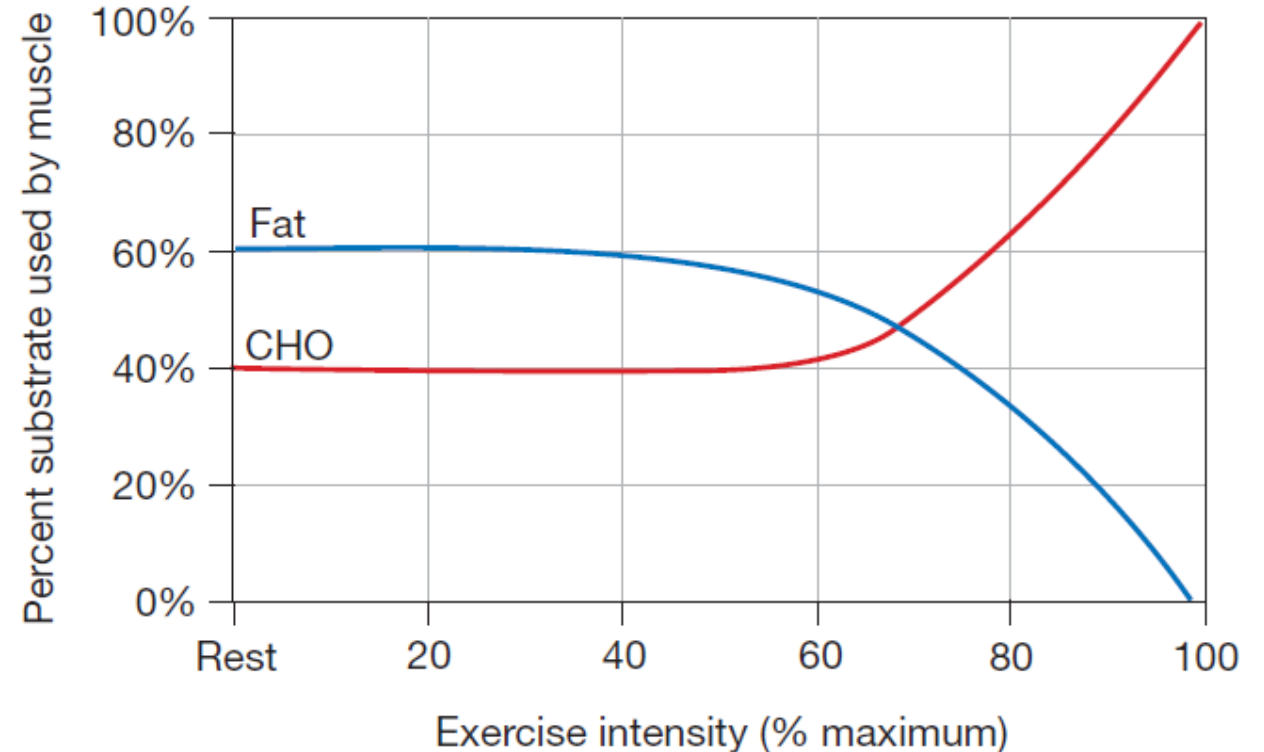
# Krevní plyny (v závislosti na spotřebě O<sub>2</sub>)



Adopted from: D.U.Silverthorn:  
Human Physiology (An Integrated  
Approach)

# Substráty využívané kosterním svalem v zátěži

- Nízká intenzita: tuky (MK)
- Vysoká intenzita: glukóza

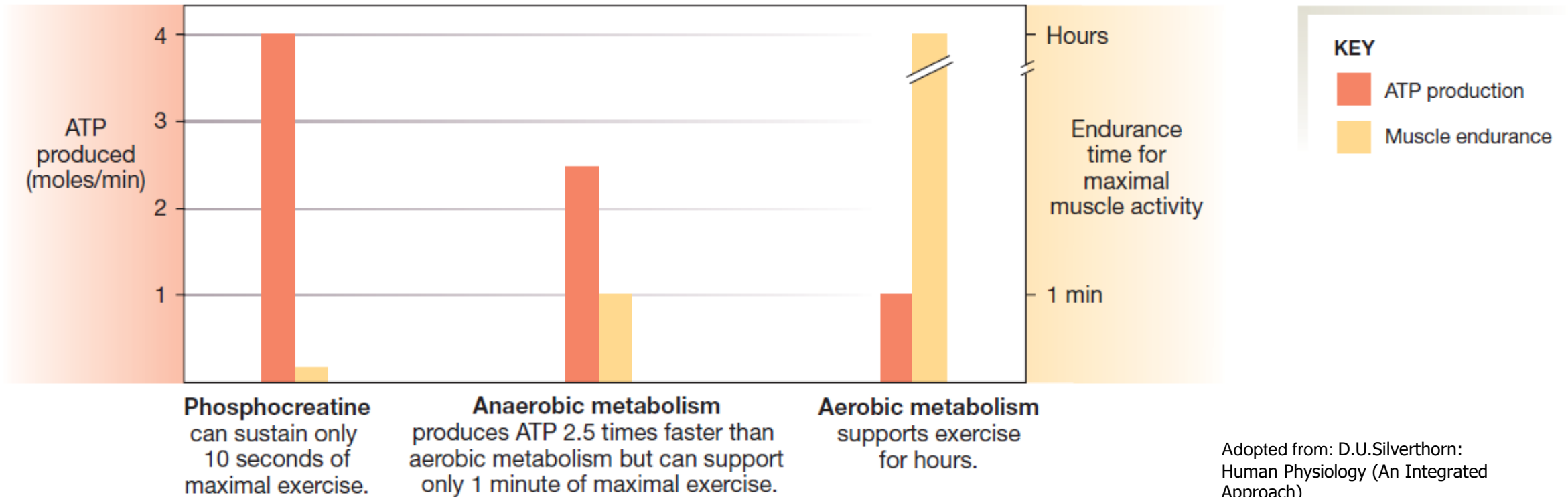


Data from G. A. Brooks and J. Mercier, *J App Physiol* 76: 2253–2261, 1994

Adopted from: D.U.Silverthorn:  
Human Physiology (An Integrated  
Approach)

MUNI  
MED

# Produkce ATP a svalová výdrž při aerobním a anaerobním metabolismu



# Testování fyzické zdatnosti (kondice)

- (Spiro)ergometrie
- Standardizovaná zátěž
  - exaktně: W/kg
  - poměrově: MET – metabolický ekvivalent
    - poměr mezi aktuálním metabolickým obratem a metabolickým obratem v klidu v sedě
    - 1 MET = spotřeba 3,5 ml O<sub>2</sub>/kg.min ≈ 4,31 kJ/kg.h
    - spánek ≈ 0,9 MET; pomalá chůze ≈ 3-4 MET; sprint, rychlý běh ≈ 16 MET
    - (+) jednoduchost; (-) nutno vyjadřovat individuálně!!!

# Ukazatele zdatnosti (fitness)

- $W_{170}$  [W/kg]
- $V_{O_2 \max}$  [ml  $O_2$  / (min.kg)]
- Aerobní / anaerobní práh
  
- Únava, selhání
- Tréning
- **Adaptace**